

Guión de prácticas: El sistema de un tanque

INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo la práctica es conveniente leer detenidamente todos los apartados e ir realizando todas aquellas tareas que se proponen, algunas de las cuales se realizarán de forma teórica, previas a la conexión con el sistema y la mayoría de ellas se realizarán en modo simulación, en modo remoto y muchas de ellas en ambos modos. Al finalizar las experiencias en modo simulación deberá enviar un informe al profesor con las experiencias realizadas en el que deben incluirse las tareas teóricas. Después de la realización de la experiencia en modo remoto deberá enviar otro informe con dichas tareas.

Para la realización de la práctica en modo simulación se tendrán que desarrollar los apartados descritos en la sección de Tareas en modo Simulación y Remoto (sección 6 del presente documento). Una vez cumplimentados todos los apartados en modo simulación se procederá a la realización de la práctica en modo remoto (ver la descripción de la Interfaz para la conexión con la planta).

El alumno deberá contrastar los resultados obtenidos en modo simulación con los resultados obtenidos en modo remoto.

Nota: Todos los apartados de la sección de Experimentos se tendrán que realizar en ambos modos (simulación y remoto). Si existe algún apartado que sólo procede realizarlo en un determinado modo, éste se indicará mediante una etiqueta de color rojo en el enunciado de dicho apartado.

1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

Los objetivos de esta práctica son los siguientes:

- Estudio de las características dinámicas del sistema. Comprender las ecuaciones diferenciales que lo describen y el proceso de linealización.
- Estudio y diseño de un sistema de control de nivel utilizando controladores PI.
- Estudio del efecto de las perturbaciones sobre el sistema.
- Estudio y diseño de un control por realimentación para compensación de las perturbaciones.
- Empleo de determinadas funcionalidades del e-Journal: salvar registros, exportar registros, crear notas, ...

Por ello el documento está estructurado de la siguiente manera. En el primer apartado se realiza una descripción del sistema. En el segundo se presenta el modelo dinámico del sistema, que recoge todas las aproximaciones habituales para el estudio teórico. En el tercer apartado se describen las distintas estrategias de control de nivel que se van a utilizar. Por último en el cuarto apartado se incluyen los diferentes experimentos a realizar.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Esta práctica se encuentra enmarcada como un subconjunto de una planta de cuatro tanques que se encuentra disponible en el laboratorio de Control Automática, Robótica y Visión Artificial de la Universidad de Almería. La planta de 4 tanques de laboratorio, cuyo esquema se muestra en la Figura 1, constituye un excelente campo de ensayo de estrategias de control multivariable a nivel industrial (nótese que todos los actuadores y sensores que implementa son además de amplio uso en entornos químicos e industriales en general).

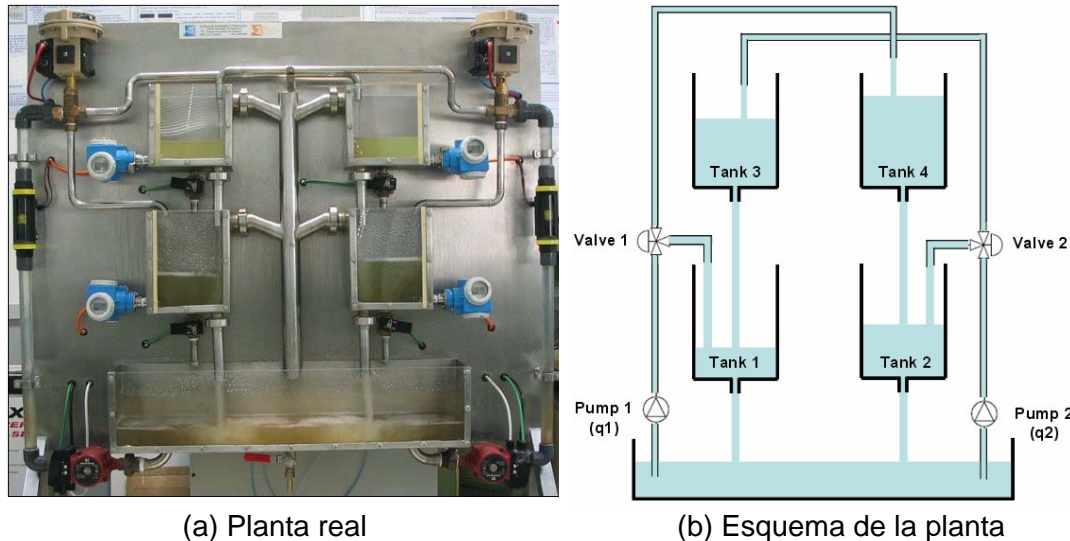


Fig. 1. Sistema de la maqueta de cuatro tanques.

Las dos señales de control que se utilizan son las tensiones (0-10 V) que se envían desde el computador de control a las bombas, cuya dinámica no-lineal se ha linealizado usando un control interno en cascada, de forma que se obtiene al caudal demandado actuando sobre la tensión de alimentación. El objetivo de esta planta es controlar la altura de los dos tanques inferiores actuando sobre las bombas. Las válvulas de tres vías permiten fraccionar el caudal que va por cada una de las ramas, de modo que parte del caudal circula hacia uno de los depósitos inferiores y el resto hacia el superior de la banda contraria. De esa forma, según sea la posición que se escoge de las válvulas de tres vías, se puede hacer que el sistema sea más o menos complejo de controlar. Intuitivamente, parece más sencillo controlar el sistema cuando la fracción de caudal que circula por las ramas inferiores es mayor a la que circula por las ramas superiores, que hacen de perturbaciones para la altura de los tanques inferiores (caso en que el comportamiento es de fase mínima). En el caso contrario, el sistema es de fase no mínima y resulta muy complejo de controlar.

Aunque el objetivo principal de esta planta es el desarrollo y estudio de estrategias de control multivariable, gracias a su gran flexibilidad en esta práctica se va a utilizar para modelar y controlar la altura de un tanque.

Las secciones de descarga inferiores han sido configuradas a

$$a_1 = a_2 = 2.1382 \text{ cm}^2,$$

las superiores a

$$\alpha_3 = \alpha_4 = 0.9503 \text{ cm}^2,$$

y las secciones de los tanques vienen dadas por

$$A = 389.16 \text{ cm}^2.$$

El diagrama de bloques que representa el sistema de control general de la maqueta viene dado en la Figura 2.

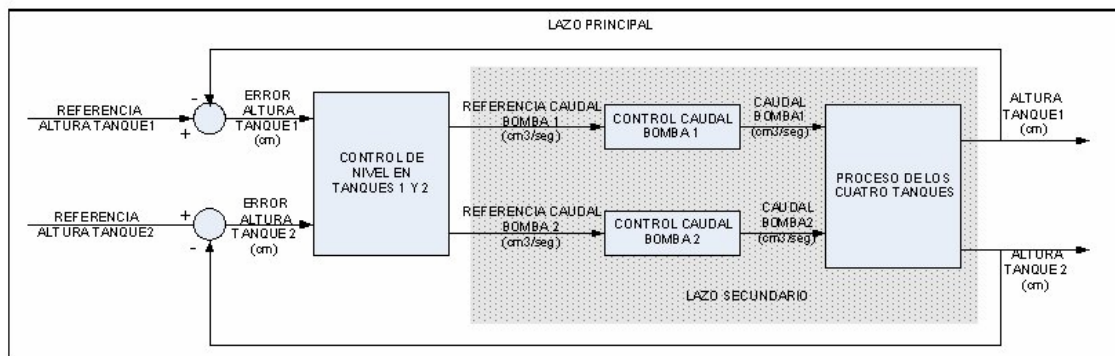


Fig. 2. Esquema de control general de la maqueta de cuatro tanques.

Es necesario resaltar que debido al comportamiento no lineal de las bombas de caudal instaladas en la maqueta, ha sido necesario implementar un control en cascada que se encargue de asegurar un caudal deseado a la salida de las bombas. La relación entre el caudal y la tensión de entrada responde a un sistema de primer orden con retardo, cuyos parámetros además cambian con el punto de operación (es un sistema fuertemente no lineal). Sin embargo, se ha incluido un control interno realimentado con un PI adecuadamente sintonizado para conseguir que la dinámica sea muy rápida comparada con la de los tanques y por tanto se pueda considerar la relación entre caudal y tensión como una ganancia (aproximación). Este esquema de control se muestra en la Figura 3.

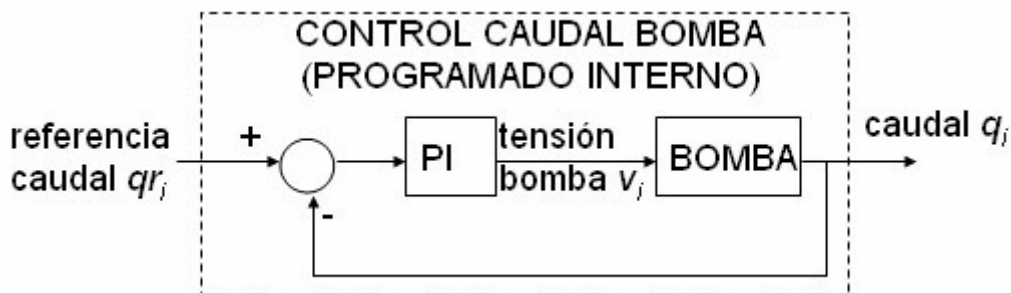


Fig. 3. Esquema de control para controlar caudal de las bombas.

De esta manera, la entrada a nuestro sistema serán directamente los caudales de las bombas en lugar de las tensiones de las mismas.

Tal y como se indicó anteriormente, gracias a la flexibilidad de la maqueta de cuatro tanques, ésta puede ser configurada para poder abordar problemas de control más sencillos que el control multivariable. Este es el caso de esta práctica, donde el principal objetivo es el control de nivel de un tanque sometido a la posible perturbación de un tanque superior. Este esquema puede ser expresado en la maqueta de cuatro tanques centrándose solamente en una de las ramas de los tanques y configurando los valores de las válvulas de tres vías a:

$$\gamma_1 = 1; \gamma_2 = 0$$

Un esquema de esta configuración se muestra en la Figura 4.

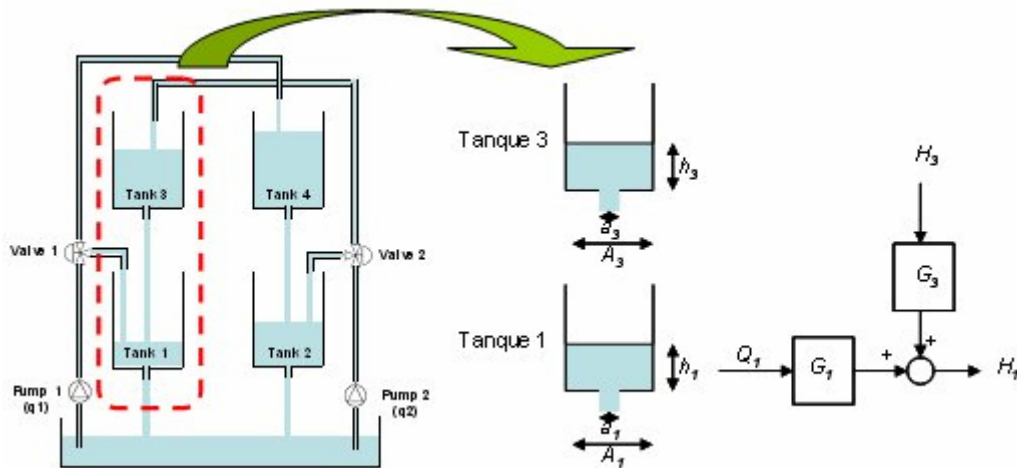


Fig. 4. Sistema de control de nivel de un tanque.

3. EL MODELO MATEMÁTICO

Para trabajar con un solo tanque, hay que posicionar una de las válvulas de tres vías para que todo el fluido caiga únicamente en el tanque inferior, mientras que la otra válvula se sitúa para que únicamente pase por el tanque superior. De esa forma, se podrá controlar la altura de un tanque mediante la manipulación del caudal de la bomba asociada y se podrán introducir perturbaciones realizando descargas desde el tanque superior, que se ha llenado utilizando la otra bomba.

Se puede obtener un modelo muy sencillo mediante ciertas aproximaciones utilizando las ecuaciones de Bernouilli y de balance de masas. Se obtiene de esta forma un modelo que relaciona los caudales de entrada a cada tanque (q_i) con las alturas de los cuatro tanques (h_i):

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{1}{A_1} q_1 \\ \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{1}{A_3} q_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

- h_i representan los niveles de líquido en cada tanque.
- a_i son las secciones de salida de los tanques.
- A_i representa la sección de los tanques.
- Q_i son los caudales de flujo de las bombas 1 y 2.
- g es la gravedad.

Considérese:

$$h_i^0, A_i \text{ y } a_i$$

respectivamente para el tanque i : la altura de ese tanque en el punto de trabajo en torno al cual se ha linealizado, el área de la base de dicho tanque y la sección de su orificio de descarga.

A partir de modelo no lineal, para un punto de operación estacionario ($dh_i/dt=0$) caracterizado por

$$h_i^0 \text{ y } q_i^0$$

se deduce que:

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1^0} &= \frac{1}{A_1} q_1^0 + \frac{1}{A_1} q_2^0 \\ a_3 \sqrt{2gh_3^0} &= q_2^0 \end{aligned}} \quad (2)$$

Tras un proceso de linealización mediante el desarrollo en serie de Taylor de la ecuación (1), y haciendo uso de la ecuación (2) se obtiene el siguiente modelo linealizado:

$$\boxed{H_1(s) = \underbrace{\frac{c_1}{T_1 s + 1}}_{G_1(s)} Q_1(s) + \underbrace{\frac{c_1}{(T_3 s + 1)(T_1 s + 1)}}_{G_3(s)} Q_2(s)} \quad (3)$$

donde

Inspeccionando las ecuaciones del proceso (o por sentido común), es sencillo establecer que la variable controlada es el nivel del tanque 1 ($h_1(t)$) y que la señal de control viene dada por el caudal de la bomba 1, $Q_1(t)$. La dinámica que relaciona la altura del tanque 1 con el caudal de la bomba en un punto de trabajo determinado viene dada por la función de transferencia $G_1(s)$ de la ecuación (3). De esta forma, es sencillo diseñar un controlador $C_1(s)$ que trate de alcanzar unas especificaciones determinadas.

Teniendo en cuenta lo expuesto, en el laboratorio diseñado para llevar a cabo la práctica sobre el sistema de un tanque, se permite realizar dos tipos de control sobre el sistema:

- **Control manual.** Es decir, realmente no se realiza control. Este modo de operación servirá para estudiar la respuesta del sistema en lazo abierto y consistirá en controlar el sistema sin ninguna acción de control más que lo que los cambios que el usuario estime oportunos en cada momento para conseguir ajustarse a las consignas especificadas.
- **Control utilizando controladores PID.** En concreto se verá que con un PI es suficiente para controlar el nivel de un tanque, por lo que se han colocado dos PI, uno para llevar a cabo el control del primer tanque y otro para el del segundo, aunque la configuración desarrollada por defecto daría opción a colocar un controlador PID para llevar a cabo el control.

De manera general, cada uno de los dos controladores PI se va a diseñar como viene descrito a continuación, o lo que es lo mismo, siguiendo lo estudiado en la teoría. La educación básica considerada para el control PI será:

$$C(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] \quad (4)$$

Donde:

- K_p es la ganancia proporcional del controlador.
- T_i el tiempo integral del controlador.

Haciendo uso del modelo matemático comentado en la sección 3 de este guión, es sencillo establecer que el comportamiento del nivel del primer tanque con respecto a un cambio en la entrada de caudal de la primera bomba responde a un sistema de primer orden. Por tanto, el modelado de estos comportamientos responde a una ecuación genérica de sistema de primer orden como la que se muestra en la siguiente ecuación.

$$\frac{k}{\tau s + 1} \quad (5)$$

Donde:

- k es la ganancia del sistema.
- τ es la constante de tiempo del sistema.

La asociación entre los parámetros de la ecuación y del modelo se ha establecido ya en las experiencias realizadas en el pre-laboratorio.

De esta manera, cada uno de los subsistemas (planta + controlador) con los que se va a trabajar responderá al esquema de control que se muestra en la Figura 6.

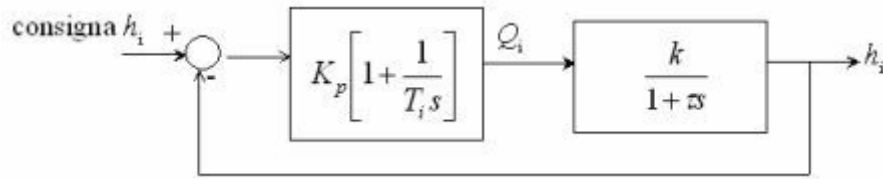


Fig. 6. Control PI de un tanque.

Para el diseño del controlador se hará uso del *método de cancelación de polos*. Este método consiste en igualar la componente integral del controlador a la constante en bucle abierto del sistema, $T_i = \tau$, desarrollándose de la siguiente forma:

$$G_{bc}(s) = \frac{K_p \cdot \left(\frac{T_i \cdot s + 1}{T_i \cdot s} \right) \cdot \frac{k}{\tau \cdot s + 1}}{1 + K_p \cdot \left(\frac{T_i \cdot s + 1}{T_i \cdot s} \right) \cdot \frac{k}{\tau \cdot s + 1}} = \frac{k \cdot K_p}{\tau \cdot s + k \cdot K_p} = \frac{1}{\frac{\tau}{k \cdot K_p} \cdot s + 1}$$

De esta forma, el problema de diseño se traslada a imponer una especificación en la constante de tiempo en bucle cerrado, τ_{bc} , lo cual permitirá obtener el valor de la constante proporcional del controlador:

$$K_p = \frac{\tau}{\tau_{bc} \cdot k} \quad (6)$$

5. TAREAS TEÓRICAS (Previas a la experimentación)

En este apartado se exponen una serie de tareas teóricas, previas a la realización de las experiencias prácticas, con los siguientes objetivos fundamentales:

- Estudiar la dinámica de la planta antes de acometer experiencias de control sobre ella.
- Estudiar el comportamiento del sistema cuando se utilizan distintos controladores: PI, PID, así como la influencia que tiene el cambio en los parámetros del controlador sobre las respuestas del sistema.
- Estudiar la influencia de las perturbaciones.
- Estudiar el diseño de un controlador por adelantado (**Opcional**).

6. TAREAS EN MODO SIMULACIÓN Y REMOTO (Experimentos)

En este apartado se describen cada uno de los experimentos de laboratorio que el alumno debe realizar tanto en modo simulación como remoto, de manera que de cada uno ellos deberá incluir la experiencia llevada a cabo en los informes que se envíen al profesor al finalizar las distintas partes de la práctica.

6.1. Entorno de experimentación

Con este primer experimento se pretende que el alumno se familiarice con la aplicación. Para ello ejecutar los pasos siguientes:

1. Encender el computador.
2. Entrar en eMersion con el login y password asignadas.
3. Observar que en el entorno aparece tanto la interfaz de la aplicación como el e-Journal.
4. Observar la interfaz de la aplicación desarrollada con Ejs.
5. Revisar el documento en el que se describe el laboratorio virtual desarrollado e interactuar al mismo tiempo con la aplicación.
6. Guardar alguna imagen en el e-Journal.
7. Guardar algún registro de datos en el e-Journal.

6.2. Estudio de las características del proceso. Ensayos en bucle abierto.

El objetivo del modo de operación manual del sistema es conseguir calcular los niveles en estado estacionario para diferentes caudales de entrada.

La experiencia consistirá en observar como cambiando los valores de entrada de la bomba se modifica el nivel de líquido en el tanque, para poder así estudiar su comportamiento. Utilizado este modo de operación el estudiante se debe dar cuenta de que el sistema es de naturaleza no lineal, al comprobar como varía la altura de líquido en el tanque en función del caudal de entrada al mismo.

Para ello se deben llevar a cabo los pasos siguientes:

1. Dar al Play para iniciar la simulación.
2. Seleccionar el control manual.
3. Iniciar la captura de datos en la opción *Start Record*.
4. Manipular el caudal de la bomba 1 para conseguir un estado estacionario de 6cm en el tanque 1 ($q_1=232 \text{ cm}^3/\text{s}$). Anotar esos valores para futuras experiencias. Para manipular la bomba tiene dos opciones, la primera es manipular las barras de desplazamiento colocadas a tal efecto en el Interfaz del laboratorio, o bien, utilizar los campos numéricos colocados debajo de las gráficas y que en modo manual estarán editables, para introducir un valor numérico de los caudales de las bombas. Para realizar la experiencia de forma correcta debe esperar el tiempo suficiente a que el sistema realmente alcance el estado estacionario, y manipular las bombas lo suficientemente rápido para que los tanques no se desborden. Como el sistema es en general de comportamiento lento, esto no será difícil. No obstante, si el nivel del líquido contenido en los tanques supera su altura máxima el sistema está protegido contra desbordamiento y lo que haría sería poner de forma automática la

- bomba causante de ese efecto a 0, de forma que el sistema no se inunde.
5. Permaneciendo en el punto de trabajo definido en el apartado anterior, introducir un escalón en bucle abierto en la bomba hasta $q_1=299.5 \text{ cm}^3/\text{s}$.
 6. Conservando el punto de operación alcanzado anteriormente, aplicar una perturbación aportando un caudal en la bomba 2 de $q_2=100 \text{ cm}^3/\text{s}$. Esperar a que el sistema alcance el estado estacionario tras el efecto de la perturbación.
 7. Finalizar el registro de datos con la opción *Stop Record*. Los datos se guardarán un archivo de registro .m.

A partir del modelo matemático descrito en el apartado 3 de este documento y teniendo en cuenta la teoría relativa a los sistemas de primer orden descrita en el Anexo 1, se sabe que el sistema de un tanque se puede describir mediante el siguiente modelo:

$$H_1(s) = \underbrace{\frac{c_1}{T_1 s + 1}}_{G_1(s)} Q_1(s) + \underbrace{\frac{c_1}{(T_3 s + 1)(T_1 s + 1)}}_{G_3(s)} Q_2(s)$$

Haciendo uso de esta modelo, se desea validar el resultado del modelo teórico con los datos experimentales. Para ellos se llevarán a cabo las siguientes tareas:

1. Calcular los parámetros del modelo teórico lineal para el punto de operación indicado anteriormente. Obtener la función de transferencia que relaciona el caudal Q_1 con la altura H_1 ($G_1(s)$) y la referente a la perturbación que relaciona el caudal Q_2 con la altura H_1 ($G_3(s)$).
2. A partir de los datos obtenidos con los experimentos anteriores y que se encuentran almacenados en el archivo de registro .m, obtener los modelos experimentales para las funciones de transferencia $G_1(s)$ y $G_2(s)$ siguiendo los pasos indicados en el Anexo 1.
3. Comparar los modelos obtenidos en los puntos anteriores y comentar los resultados.

6.3. Control de nivel: Seguimiento a referencias

En esta experiencia se muestra el control en lazo cerrado del sistema. Se pretende efectuar cambios de consigna y utilizando un control PI desarrollado en el laboratorio sobre la planta, comprobar el efecto que sobre la respuesta del sistema tienen los parámetros de control.

Para ello, diseñar un controlador PI para controlar la altura de nivel del tanque 1 a través del caudal impulsado por la bomba 1 para trabajar en torno a una altura de referencia de $h_1=8\text{cm}$. Las especificaciones de diseño son que el sistema debe tener error en régimen permanente nulo a entrada en escalón y el sistema en bucle cerrado debe tener un comportamiento parecido al de un sistema de primer orden con una constante de tiempo de 20 s.

Para llevar a cabo esta experiencia de control, realizar los siguientes pasos:

- Pulsar Reset y Play para iniciar una nueva simulación.
- Llevar el sistema en modo manual al punto de operación deseado.
- Configurar los parámetros del controlador PI haciendo uso de las casillas correspondientes en el laboratorio virtual.
- Fijar la consigna de referencia a 8 cm. Esta acción se puede realizar de dos formas, o bien, con las flechitas que indican las consignas en el dibujo, o bien, con los campos numéricos editables que hay bajo las gráficas y hacen referencia a estos valores.
- Activar el modo Control Automático.
- Esperar a que el sistema alcance el estado estacionario y cuando lo haya hecho, realizar diferentes cambios en la consigna para comprobar el funcionamiento del sistema. Analizar los resultados obtenidos y comentar como se comporta el sistema respecto a los distintos cambios.
- Comprobar que las especificaciones de diseño requeridas se han cumplido.

6.5. Control de nivel: rechazo a perturbaciones

Se pretende en este apartado ver la reacción del sistema a una perturbación pero cuando se tiene activado el control Automático.

Para provocar las perturbaciones en el proceso se deberá arrancar la bomba 2 a un caudal de 100 cm³/s y analizar cómo se comporta el sistema de control desarrollado cuando está sometido a perturbaciones procedentes del agua que cae del tanque 3.

En todos los casos, si las perturbaciones no son excesivas, el sistema debe reaccionar adecuadamente.

Para llevar a cabo esta experiencia realice las siguientes acciones:

1. Pulsar Reset y Play.
2. Realizar los mismos pasos que en el punto anterior para controlar el sistema entorno a una referencia de 8 cm.
3. Cuando el sistema alcance el estacionario, activar la bomba 2 con un caudal de 100 cm³/s.
4. Observar cómo el sistema, aunque lentamente, corrige la perturbación.

(Este apartado sólo se considerará en **modo simulación**) - **Opcional**.

Diseñar un controlador por prealimentación (adelanto) que ayude a atenuar el efecto que tiene esta perturbación sobre el nivel del tanque 1 y probarlo en simulación sobre el laboratorio virtual